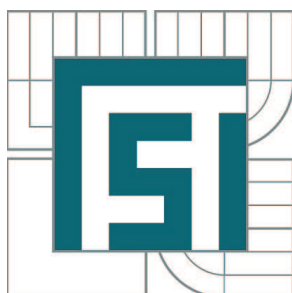


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## **VÝMĚNÍKY TEPLA**

HEAT EXCHANGERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**ŠTĚPÁN ROSYPAL**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. MAREK BALÁŠ**

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Štěpán Rosypal

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Výměníky tepla**

v anglickém jazyce:

### **Heat Exchangers**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce spočívá ve vytvoření přehledu výměníků tepla a jejich aktuálních provozních problémů.

Cíle bakalářské práce:

- 1/ Provést rešerši mapující výměníky tepla v energetice
- 2/ Zjistit hlavní aktuální problémy při provozování výměníků tepla

Seznam odborné literatury:

Baláš: Kotle a výměníky tepla

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Baláš

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 5.11.2009

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato bakalářské práce má seznámit čtenáře se základními druhy výměníků tepla používanými v energetice a jejich rozdělením. Je zde uvedeno jejich třídění jak z hlediska účelu a funkce, tak i z hlediska konstrukčního, které je doplněno porovnáním rekuperačních výměníků. Dále se zabývá možnostmi zvyšování účinnosti, problémy při provozu a jejich odstraňováním. Zejména pak zanášením a čištěním výměníků tepla.

## **Klíčová slova**

výměník tepla, teplotnosné médium, sdílení tepla, účinnost

## **Abstract**

This bachelor thesis shall inform readers about basis types of heat exchangers used in power industry and their basis sorting. They are sorted not only from the point of view of their purpose and function, but also, from the point of view of their construction. Apart from that, there is a comparison of recuperative heat exchangers. Moreover, the thesis deals with possibilities to enhance their efficiency, possible problems in service and ways to solve these problems, mainly with sedimentation and cleaning heat exchangers.

## **Keywords**

heat exchanger, heat transfer media, heat transfer, effectivity

### **Bibliografická citace**

ROSYPAL, Š. *Výměníky tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš.

## **Čestné prohlášení**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně, dne 24. května 2010

.....

Štěpán Rosypal

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Marku Balášovi za cenné rady, připomínky a přínosné konzultace v průběhu přípravy celé bakalářské práce.

# Obsah

<b>ÚVOD.....</b>	<b>7</b>
<b>1 VÝMĚNÍKY TEPLA V ENERGETICE .....</b>	<b>8</b>
1.1 ÚČEL VÝMĚNÍKŮ TEPLA .....	8
1.2 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA VÝMĚNÍKY TEPLA.....	8
1.2.1 Požadavky kladené na výměník.....	8
1.2.2 Požadavky kladené na teplotonosná média .....	9
<b>2 ROZDĚLENÍ VÝMĚNÍKŮ TEPLA .....</b>	<b>10</b>
2.1 PODLE VZÁJEMNÉHO PROUDĚNÍ MÉDIÍ .....	10
2.2 PODLE ZPŮSOBU PŘEDÁVÁNÍ TEPELNÉ ENERGIE .....	11
2.3 PODLE ZPŮSOBU PŘENOSU TEPLA .....	12
2.4 PODLE KOMBINACE TEPLONOSNÝCH MÉDIÍ .....	12
2.5 PODLE ÚČELU A POUŽITÍ .....	12
<b>3 ZPŮSOBY SDÍLENÍ TEPLA VE VÝMĚNÍCÍCH .....</b>	<b>15</b>
3.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM (KONDUKCI) .....	15
3.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKCI) .....	15
3.3 SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM (RADIACÍ).....	16
3.4 PROSTUP TEPLA STĚNOU VÝMĚNÍKU .....	17
<b>4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VÝMĚNÍKŮ TEPLA .....</b>	<b>18</b>
4.1 KONSTRUKCE REKUPERAČNÍCH VÝMĚNÍKŮ .....	18
4.1.1 Trubkové výměníky.....	18
4.1.2 Deskové výměníky .....	20
4.1.3 Spirálové výměníky tepla.....	21
4.1.4 Porovnání rekuperačních výměníků .....	21
4.2 KONSTRUKCE REGENERAČNÍCH VÝMĚNÍKŮ .....	22
4.3 KONSTRUKCE SMĚŠOVACÍCH VÝMĚNÍKŮ .....	22
4.3.1 Vstřík vody do páry.....	23
4.3.2 Ohřev napájecí vody.....	23
<b>5 ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI.....</b>	<b>24</b>
<b>6 PROVOZ VÝMĚNÍKŮ TEPLA.....</b>	<b>26</b>
6.1 POŠKOZOVÁNÍ VÝMĚNÍKŮ .....	26
6.2 ZANÁŠENÍ VÝMĚNÍKŮ .....	26
6.3 ČIŠTĚNÍ VÝMĚNÍKŮ TEPLA .....	27
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>29</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A JEJICH JEDNOTEK.....</b>	<b>32</b>

## ÚVOD

V mnoha oblastech lidské činnosti, jako například farmaceutický, potravinářský, chemický průmysl a energetika, se objevuje potřeba přenosu tepla mezi dvěma látkami o různých teplotách. Tuto funkci plní výměníky tepla. Díky různorodým oblastem použití a velkému množství pracovních látek existuje mnoho konstrukčních provedení výměníků.

V oblasti energetiky mají výměníky tepla několik charakteristických rysů. Setkáváme se u nich s vysokými tlaky i teplotami, které kladou vysoké nároky na materiály i konstrukční provedení. Jsou také součástí zařízení na výrobu energie (kotlů aj.). Při výrobě energie je kladen velký důraz na účinnost přeměny energie, tzn. je třeba spalovat co nejméně paliva při co největším využitelném výkonu. Výměníky tepla se navrhují tak, aby měly co nejlepší přenos tepelné energie při co nejmenších tlakových ztrátách.

Cílem této práce je provést rešerši mapující výměníky tepla v energetice a popsat jejich problémy při provozu.



# 1 VÝMĚNÍKY TEPLA V ENERGETICE

Přenos tepelné energie na vytápění, technologický ohřev nebo na výrobu elektrické energie se odehrává v tepelných systémech, které nazýváme **výměníky tepla**. Jsou to zařízení pro uskutečnění průběžného nebo přerušovaného přenosu tepelné energie mezi dvěma nebo více proudícími teplotonosnými médii. Dochází zde k předávání tepla z teplého (ohřívacího) média do média chladnějšího (ohřívaného). Charakteristickým rysem výměníků tepla v energetice je omezení pracovních médií převážně na vodu, vodní páru, vzduch a spaliny [1,2].

## 1.1 Účel výměníků tepla

Výměníky tepla mají mnoho možností využití, přičemž v energetice se podle zdroje [1] nejčastěji setkáme s těmito aplikacemi.

- Ohřev pracovní látky – jedná se především o ohřev vody a ohřev vzduchu parou, horkou vodou nebo spaliny.
- Chlazení pracovní látky – jedná se o snížení teploty pracovní látky.
- Kondenzace páry – účelem je zkapalnění páry, přičemž odvedené teplo bývá obvykle ztrátovým teplem.
- Využití odpadního tepla
- Výroba páry

## 1.2 Základní požadavky na výměníky tepla

Při návrhu výměníků je jedním z hlavních požadavků co nejintenzivnější předání tepla při nízkých nákladech. Intenzivního přestupu tepla můžeme dosáhnout volbou vhodného materiálu pro konstrukci výměníku, konstrukčními úpravami a volbou vhodného pracovního média.

Podle informací ze zdrojů [1,2] můžeme rozdělit a zdůvodnit požadavky na konstrukci výměníku a teplotonosných médií.

### 1.2.1 Požadavky kladené na výměník

Výměník tepla by měl splňovat několik základních parametrů, které je ale často obtížné splnit.

- co nejmenší rozměry a hmotnost
- co nejnižší cena
- co nejmenší čerpací práce
- spolehlivost provozu
- snadná údržba

Požadavky na nízkou čerpací práci a malé rozměry jsou protichůdné. Zmenšení čerpací práce má za následek zvětšení rozměrů a hmotnosti výměníku. Konečný návrh je proto vždy kompromisem mezi těmito požadavky.

Požadavek na spolehlivost provozu je zcela zřejmý. Neplánované vyřazení výměníku tepla z provozu může mít za následek velké ekonomické ztráty. Spolehlivost je dána především minimální poruchovostí, snadnou údržbou a opravitelností výměníku.

### 1.2.2 Požadavky kladené na teplonosná média

Volba správného pracovního média závisí na mnoha faktorech (pracovní teplota, tlak, velikost výměníku...) a musí splňovat velké množství požadavků.

- velká měrná tepelná kapacita
- vysoký součinitel tepelné vodivosti
- vhodný vztah mezi teplotou varu a tlakem
- nízká viskozita a s ní související nízké tlakové ztráty
- nízká agresivita
- zdravotní nezávadnost
- dostatečný výskyt v biosféře
- relativně nízká cena

V obvyklých případech splňuje tyto požadavky nejlépe voda a vodní pára. Jejich nevýhodou je jednak možnost vzniku koroze, jednak vznik nánosů solí obsažených ve vodě na výhřevné ploše. Další problém je udržování dostatečného tlaku, aby při dané pracovní teplotě nedocházelo k varu a nevznikala pára (výjimkou jsou výparníky a odparky).

Pro přenos tepla s vysokou teplotou do 900 °C se používají tekuté kovy, např. směs sodíku a draslíku. Výhody těchto slitin jsou vysoká teplotní kapacita, dobrá tepelná vodivost a přestupní součinitel. Nevýhodou je ovšem je, že při zchladnutí zařízení ztuhnou a musí se proto při odstavování včas z okruhu vypouštět. Při netěsnosti výměníku reaguje navíc sodík s vodou a prudce hoří.

Vzduch, spaliny, popř. jiné plyny mají nevýhody nízké měrné tepelné kapacity, tepelné vodivosti a špatného součinitele přestupu tepla. V důsledku toho vyžadují větší objemové průtoky velké výhřevné plochy výměníků. Podobné vlastnosti má také přehřátá pára, proto ji není vhodné používat pro otopné výměníky. Vysoká teplota přehřáté páry způsobuje tepelné ztráty a vyžaduje větší tloušťku tepelné izolace u výměníků tepla i potrubí.

Volba teplonosných médií závisí na ekonomické rozvaze nalezení minima investičních a provozních nákladů na předepsanou jednotku energie.

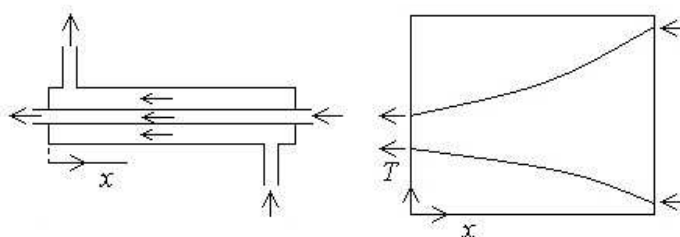
## 2 ROZDĚLENÍ VÝMĚNÍKŮ TEPLA

Podle zdrojů [2,3] je možné výměníky rozdělit podle několika kritérií.

### 2.1 Podle vzájemného proudění médií

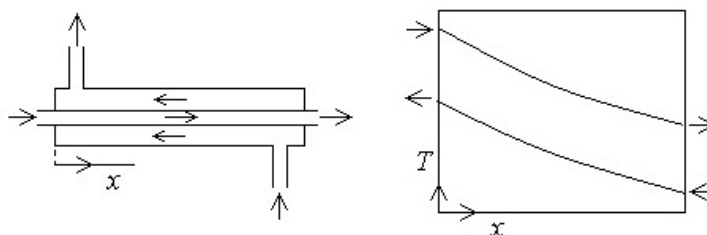
Různé způsoby vzájemného proudění mají vliv na průběh přestupu tepla mezi pracovními médii.

- **Souproudé** – směry proudů médií jsou rovnoběžné a mají stejný smysl. Princip je zobrazen na Obr. 2.1.



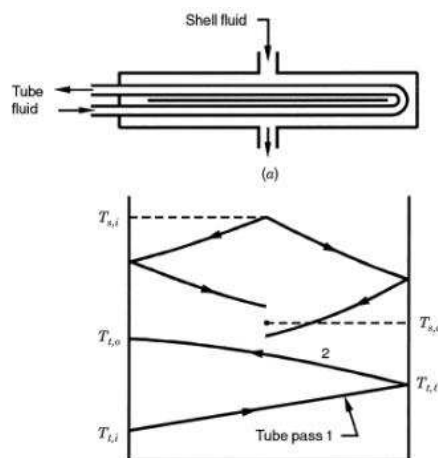
Obr. 2.1 Schéma souproudého výměníku [4]

- **Protiproudé** – směry proudů médií jsou rovnoběžné, ale mají opačný smysl. Princip protiproudého výměníku je zobrazen na Obr. 2.2



Obr. 2.2 Schéma protiproudého výměníku [4]

- **Křížové** – osy proudů jsou mimoběžné a svírají spolu v kolmém průmětu úhel 90°. Princip výměníku je zobrazen na Obr. 2.3.



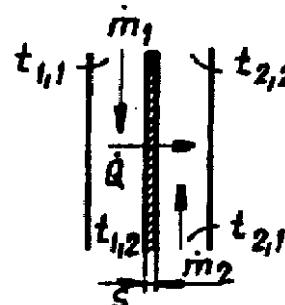
Obr. 2.3 Schéma křížového výměníku [4]

- Vícenásobně souproudé, protiproudé, a křížové proudění
- S kombinovaným prouděním

## 2.2 Podle způsobu předávání tepelné energie

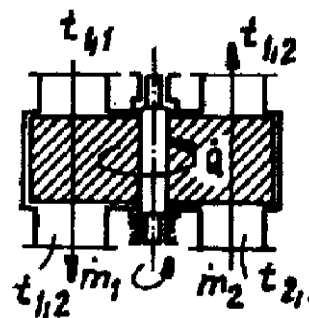
Existují čtyři základní způsoby předávání tepelné energie ve výměnících.

- **Rekuperační** – obě pracovní látky ve výměníku jsou nepropustně odděleny stěnou, která tvoří teplosměnnou plochu. Schéma je znázorněno na Obr. 2.4.



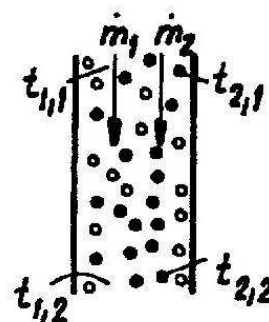
Obr. 2.4 Schéma rekuperačního výměníku [3]

- **Regenerační výměníky** – obě média se v pracovním prostoru střídavě vyměňují, přičemž přenos tepelné energie se uskutečňuje pomocí akumulace energie v teplo zprostředkujícím elementu. Schéma regeneračního výměníku je znázorněno na Obr. 2.5.



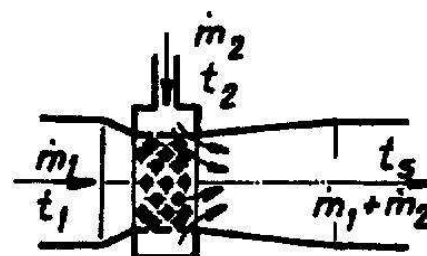
Obr. 2.5 Schéma regeneračního výměníku [3]

- **Kontaktní** – obě média se v pracovním prostoru promíchávají a předávají si tepelnou energii, následně jsou od sebe odděleny. Teplosměnná plocha je v tomto případě dána povrchem částic pevné fáze. Princip kontaktního výměníku je znázorněn na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Schéma kontaktního výměníku [3]

- **Směšovací výměníky** – výměník nemá teplosměnné plochy. Ohřívací i ohřívání médium se smíchávají a vytvoří homogenní směs. Princip směšovacího výměníku je zobrazen na Obr. 2.7.



Obr. 2.7 Schéma směšovacího výměníku [3]

## 2.3 Podle způsobu přenosu tepla

Výměníky tepla můžeme dále rozdělit podle toho, kterým ze způsobů přenosu tepla (konvekcí, radiací) se předává nejvíce tepla.

- **Konvekční** – o předaném teple rozhoduje hlavně proudící médium.
- **Sálavé (radiační)** – většina tepla se předává sáláním.
- **Kombinované** – dochází k přenosu tepla prouděním i sáláním.

## 2.4 Podle kombinace teponosných médií

Jak již bylo uvedeno výše, tak nejčastěji používaná pracovní média v energetice jsou voda, pára, spaliny a vzduch. Zde jsou uvedeny nejčastější kombinace.

- **Voda – voda**
- **Pára – voda**
- **Pára – vzduch**
- **Pára – olej**
- **Spaliny – voda**
- **Spaliny – pára**
- **Spaliny – vzduch**

## 2.5 Podle účelu a použití

Výměníky tepla rozdělujeme podle účelu a použití do několika skupin.

- **Ohříváky** – ohřívané médium v nich zvyšuje svoji teplotu, ale nedochází ke změně fáze. Příklad ohříváku vody je na Obr. 2.8.



Obr. 2.8 Ohřívák vody, Elektrárna Kolín [5]

- **Chladiče** – ochlazované médium v nich snižuje svoji teplotu beze změny fáze. Na Obr. 2.9 je uveden vodní chladič EMMEGI.



Obr. 2.9 Vodní chladič [6]

- **Výparníky a odparky** – ohřívané kapalné médium se mění v páru. Výparník je zobrazen na Obr. 2.10.



Obr. 2.10 Výparník [7]

- **Kondenzátory** – teplejší médium v parní fázi se sráží v kapalnou fázi. Příklad kondenzátoru je na Obr 2.11.



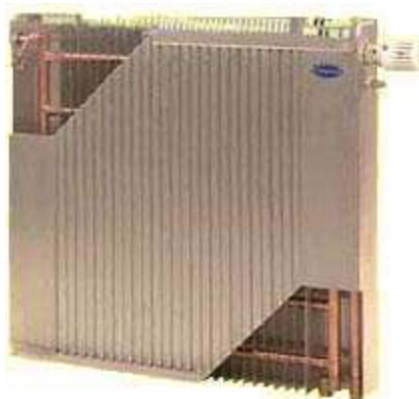
Obr. 2.11 Kondenzátor - ČEZ, a.s., Elektrárna Dětmarovice [8]

- **Přehříváky a mezipřehříváky** – slouží ke zvyšování teploty mokré, syté nebo přehřáté páry.
- **Sušárny** – přísunem tepla se dosahuje snížení vlhkosti látky v pevné fázi. Na Obr. 2.12 je zobrazena bubnová sušička.



*Obr. 2.12 Bubnová sušička [9]*

- **Termické odplyňovaky vody** – parním ohřevem vody k bodu varu dochází k vylučování pohlcených plynů.
- **Topná tělesa ústředního vytápění** – otopné médium ohřívá okolní vzduch. Příklad je zobrazen na Obr. 2.13.



*Obr. 2.13 Těleso ústředního topení [10]*

### 3 ZPŮSOBY SDÍLENÍ TEPLA VE VÝMĚNÍCÍCH

Pramen [1] uvádí, že sdílení tepla je přenos vnitřní energie, která přechází samovolně od tělesa nebo látky s vyšší teplotou k tělesu či látce s nižší teplotou. Ke sdílení tepla může docházet třemi způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací).

#### 3.1 Sdílení tepla vedením (kondukcí)

Při tomto způsobu sdílení tepla se tepelná energie přenáší pouze v důsledku vzájemného kontaktu základních částic hmoty. Přenos energie probíhá od více energetických k méně energetickým částicím. U kapalin a plynů jsou to molekuly, u pevných látek pak atomy. Podle pramene [2] se uplatňuje přednostně v látkách pevného skupenství. V kapalinách a plynech bývá jeho význam druhořadý oproti konvekci. Velikost tepelného toku je charakterizována Fourierovým zákonem

$$dq = -\lambda \frac{dt}{d\delta} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (2-1)$$

kde	q	(W.m <sup>-2</sup> )	je měrný tepelný tok, prošlý za jednotku času jednotkovou plochou,
	λ	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	je tepelná vodivost,
	dt	(°C)	je rozdíl teplot na povrchu stěny,
	δ	(m)	je tloušťka stěny.

Tepelná vodivost λ je fyzikální vlastnost látky a charakterizuje vedení tepla v konkrétní látce. Pro většinu materiálů je λ=f(t).

Podíl  $\frac{\delta}{\lambda}$  se též nazývá tepelný odpor R.

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (2-2)$$

#### 3.2 Sdílení tepla prouděním (konvekcí)

K tomuto způsobu sdílení tepla dochází při proudění tekutin a jejich kontaktu s okolními tuhými látkami (stěnami) s odlišnou teplotou. Pramen [11] uvádí, že přenos tepla konvekcí je složen ze dvou mechanismů. První mechanismus je vedení (kondukce) a probíhá pouze v **mezní vrstvě** tekutiny, která bezprostředně přiléhá ke stěně. Druhý mechanismus probíhá tak, že mikročástice tekutiny jsou strhávány z volného proudu do mezní vrstvy, kde odebírají teplo a následně se vrací zpět.

Konvekce se dělí podle typu proudění na

- **Nucenou** - k proudění dochází působením vnějšího činitele (např. čerpadlo),
- **Přírozenou** – pohyb tekutiny je vyvolán rozdílem hustoty látky u teplosměnného povrchu a ostatním objemem tekutiny vzniklým v důsledku rozdílu teplot.



Pro přenášení měrný tepelný tok platí Newtonův ochlazovací zákon

$$\dot{q} = \alpha * (T_w - T_\infty) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (2-2)$$

kde	$q$	$(\text{W.m}^{-2})$	je měrný tepelný tok,
	$\alpha$	$(\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$	je součinitel přestupu tepla,
	$T_w$	$(\text{K})$	je teplota povrchu obtékaného tělesa,
	$T_\infty$	$(\text{K})$	je teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu.

Použitý zdroj [2] uvádí, že určení součinitele přestupu tepla  $\alpha$  je na rozdíl od součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ , který je přibližně konstantní, obtížné. Závisí na mnoha faktorech jako druh tekutiny, rychlost a charakter proudění (laminární, turbulentní), typ proudění (přirozené nebo nucené), tvar a rozměry teplosměnných stěn, stav a vlastnosti tekutiny (teplota, tlak, hustota), teplotě stěny. Obecně je

$$\alpha = f(w, t, t_{st}, d, l, \lambda, \mu, \rho, c_p)$$

### 3.3 Sdílení tepla sáláním (radiací)

Zdroj [3] uvádí, že z každé látky vyzařuje nepřetržitě tepelná energie v podobě elektromagnetického záření. Pro přenos tepla je nejdůležitější infračervené záření s dlouhou vlnovou délkou, které se nazývá sálání. Zatímco přenos tepla vedením a konvekcí vyžaduje přítomnost hmotné látky, záření se může šířit i ve vakuu.

Maximální tepelný tok, který může být vyzařován z povrchu, je dán Stefan-Boltzmannovou rovnicí

$$\dot{q} = \sigma * T^4 \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (2-3)$$

kde	$q$	$(\text{W.m}^{-2})$	je měrný tepelný tok,
	$\sigma$	$(\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4})$	Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ,
	$T$	$(\text{K})$	absolutní teplota tělesa.

Tato rovnice platí pouze pro ideální zářič tzv. absolutně černé těleso, které vyzařuje maximální možnou energii. Pro reálná tělesa platí  $E = \varepsilon * \sigma * T^4$ , kde  $\varepsilon$  je poměrná zářivost a říká nám, jak efektivní je záření z povrchu v porovnání s absolutně černým tělesem.

Podle informací ze zdroje [3] u výměníků tepla dochází teoreticky ke všem výše zmiňovaným způsobům sdílení tepla. Ovšem většinou je jeden z těchto způsobů dominantní. U běžně používaných výměníků se nejvíce uplatňuje konvekční složka přestupu tepla. Naopak u výměníků s vysokými teplotami některého z médií se nejvíce uplatňuje přenos tepla sáláním, což je zřejmé z rovnice 2-3 kde je  $T^4$ .

### 3.4 Prostup tepla stěnou výměníku

Podle zdroje [2] je prostupem tepla myšlen přenos tepelné energie mezi dvěma tekutinami oddělenými pevnou stěnou. Skládá se z přestupu tepla konvekcí na obou stranách stěny a vedení tepla stěnou. Uvažujeme prostupy rovinnou a válcovou stěnou.

- **Rovinná stěna**

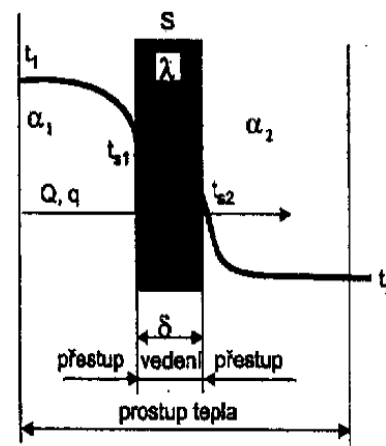
$$\dot{Q}_1 = \alpha_1 * (t_1 - t_{s1}) * S \quad (\text{W}) \quad (2-4)$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{\lambda}{\delta} * (t_{s1} - t_{s2}) * S \quad (\text{W}) \quad (2-5)$$

$$\dot{Q}_3 = \alpha_2 * (t_{s2} - t_2) * S \quad (\text{W}) \quad (2-6)$$

Prostup tepla je pak dán rovnicí prostupu tepla

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = k * \Delta t * S \quad (\text{W}) \quad (2-7)$$



Obr. 3.1 Prostup tepla rovinnou stěnou

Kde  $k$  je součinitel přestupu tepla, který lze vypočítat pomocí součtu jednotlivých tepelných odporů

$$\frac{1}{k} = \sum_{j=1}^n R_j = R_{\alpha_1} + R_{\alpha} + R_{\alpha_2} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (2-8)$$

kde  $\alpha_1$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je součinitel přestupu tepla z ohřívací látky do stěny,  
 $\alpha_2$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je součinitel přestupu tepla ze stěny do ohřívané látky,  
 $\lambda$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je součinitel tepelné vodivosti materiálu stěny,  
 $\delta$  (m) je tloušťka stěny.

Součinitel přestupu tepla rovinnou stěnou složenou z několika vrstev (platí i pro nánosy na obou stranách stěny) o různé tloušťce a různé tepelné vodivosti je dán vztahem

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (2-9)$$

- **Válcová stěna**

U válcové stěny je výhodnější, vzhledem k měnícímu se průměru trubky ve směru tepelného toku, vztáhnout součinitel tepla na jednotku délky. Ten je pak pro vícevrstvou válcovou stěnu

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (2-10)$$

kde 1 jsou parametry na vnitřní straně válcové stěny,  
 2 jsou parametry na vnější straně válcové stěny.

## 4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VÝMĚNÍKŮ TEPLA

V dnešní době existuje mnoho variant konstrukčních řešení výměníků s různými druhy a tvary teplosměnných povrchů. V této kapitole se budeme věnovat jednotlivým druhům konstrukcí.

### 4.1 Konstrukce rekuperačních výměníků

U tohoto druhu výměníků nedochází ke kontaktu pracovních látek. Ty jsou od sebe odděleny nepropustnou stěnou, která tvoří teplosměnnou plochu výměníku. Podle tvaru a provedení této plochy můžeme rozlišit několik druhů. Použitý pramen [2] uvádí následující rozdělení rekuperačních výměníků.

#### 4.1.1 Trubkové výměníky

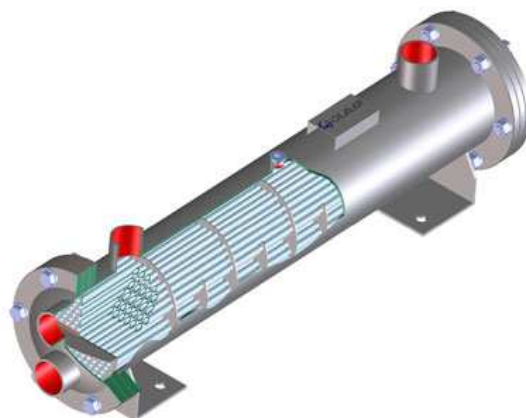
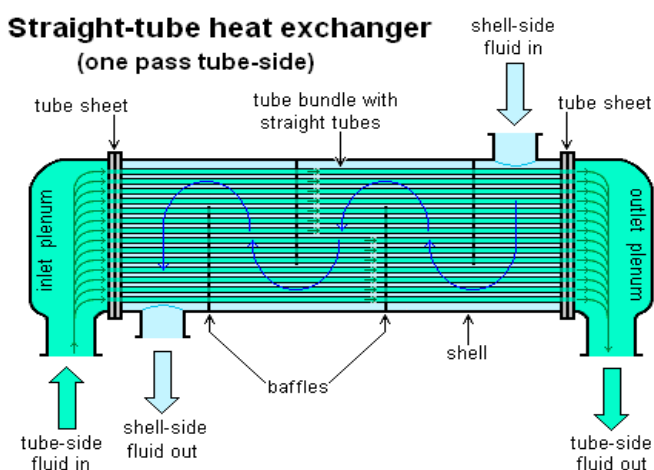
Jsou nejstarším a nejpoužívanějším typem. Mají výhodný tvar z hlediska pevnostního namáhání. Skládají se z vnějšího pláště a trubek, které jsou uvnitř. Průtokový průřez mezi trubkami bývá 2-3x větší než průtokový průřez trubek. V mezitrubkovém prostoru se obvykle umísťují přepážky, které zpomalují pohyb vnějšího média a prodlužují trajektorii proudění. Trubkových výměníků existuje několik provedení.

##### a) Plášťový výměník s rovnými trubkami

Skládají se z vnějšího pláště s dvěma přivařenými trubkovnicemi, do nichž jsou zaválcovány trubky. K trubkovnicím se připevňují víka. Schéma výměníku je znázorněno na Obr. 4.2, příklad výměníku je na Obr. 4.1.

Mezi jeho výhody patří jednoduchá výroba, možnost výměny poškozené trubky, dále pak možnost užití minimální tloušťky stěny, což vede ke snížení hmotnosti. Vnitřní části se snadno čistí a to i mechanicky.

Nevýhodou tohoto typu konstrukce je problém tepelnou dilatací. Ta se dá řešit konstrukčními úpravami. Např. kompenzace s ucpávkou, kompenzace pružným zvlněním pláště nebo kompenzace s plovoucí hlavou.

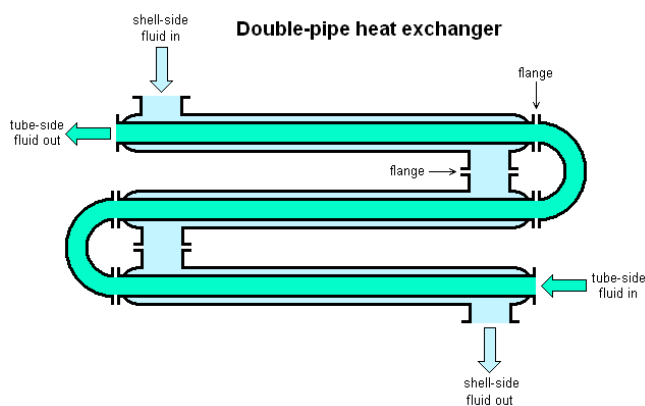


Obr. 4.2 Schéma plášťového výměníku s rovnými trubkami [12]

Obr. 4.1 Plášťový výměník s rovnými trubkami [13]

### b) Dvoutrubkový výměník

Používá se pro malé teplotní rozdíly mezi médii, malé tlaky a pro malé průtočné množství. Schéma výměníku je na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Schéma dvoutrubkového výměníku [12]



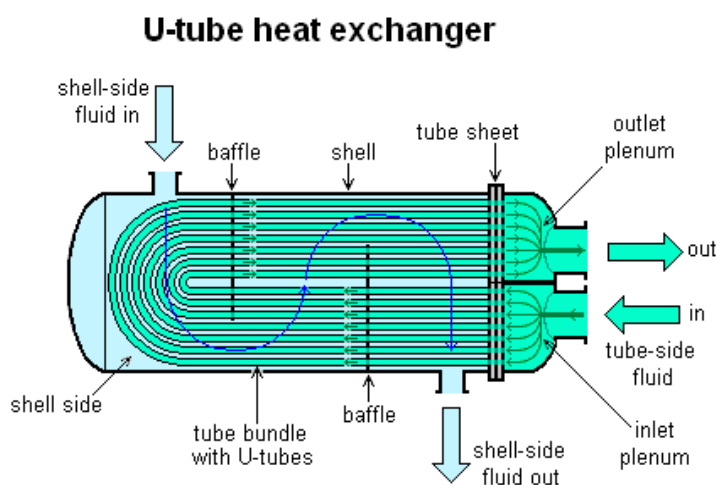
Obr. 4.4 Dvoutrubkový výměník [14]

### c) Vlášenkový výměník

Trubky jsou uvnitř pláště výměníku provedeny do tvaru “U“. Konstrukce ohřívače je tím značně zjednodušena, protože odpadá jedna vodní komora a polovina provozně nespolehlivých spojů trubek s trubkovnicemi. Schéma vlásenkového výměníku je na Obr. 4.6.

Mezi výhody tohoto typu patří dobré využití vnitřního prostoru pláště, jednodušší konstrukce a nižší hmotnost. Odpadá také problém s teplotními dilatacemi, jelikož trubky se mohou volně roztahovat.

Nevýhodou je nemožnost čištění vnitřního povrchu trubek a nemožnost výměny poškozené trubky.



Obr. 4.6 Schéma vlásenkového výměníku s U-trubkami [12]



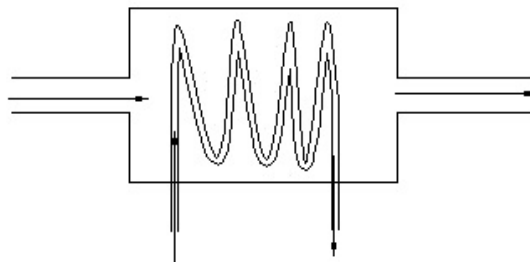
Obr. 4.5 Vlášenkový výměník tepla s U-trubkami [15]

**d) Výměník se šroubovitě vinutými trubkami**

Trubky u tohoto typu výměníku jsou uvnitř pláště vinuty šroubovitě. Mohou být vinuty i ve více řadách. Schéma je znázorněno na Obr. 4.7.

Výhodou je jednoduchá výroba a využití čistého protiproudu při zachování příčného obtékání trubek média na vnější straně.

Nevýhodou je nutnost výměny celé trubky při opravách a horší využití vnitřního prostoru.



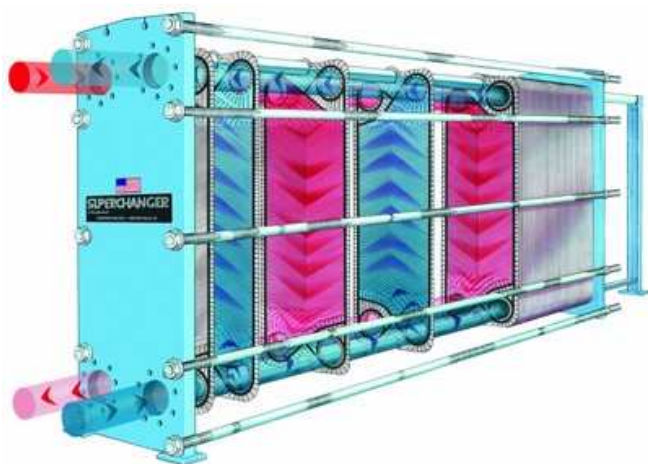
Obr. 4.7 Schéma výměníku se šroubovitě vinutými trubkami

**4.1.2 Deskové výměníky**

Podle informací ze zdroje [21] je teplosměnná plocha vytvořena z tenkých kovových desek, které jsou k sobě pevně spojeny pájením, nebo jsou staženy šroubovými svorníky (mezi jednotlivými deskami je pak těsnění). Desky mají na sobě vyhloubené kanálky. Jedno médium proudí jednou skupinou kanálků, druhé pak kanálky bezprostředně přilehlými. Schéma deskového výměníku je na Obr. 4.8.

Výhodou deskového výměníku je kompaktnost řešení, snadné zvyšování výkonu přiřazováním dalších desek a čistý protiproud v sousedních deskách.

Mezi nevýhody patří problémy s dosažením těsnosti při větších tlacích a požadavek na zvýšenou čistotu obou médií, aby nedocházelo k zanášení.



Obr. 4.8 Schéma deskového výměníku [16]



Obr. 4.9 Deskové výměníky [17]

### 4.1.3 Spirálové výměníky tepla

Dle informací ze zdroje [21] proudí u tohoto typu výměníku obě média (zpravidla protiproudě) spirálovitě zakřivenými kanály, přičemž zakřivení zvyšuje intenzitu přestupu tepla. Princip je znázorněn na Obr. 4.11. Teplosměnná plocha je tvořena dlouhou svinutou deskou, proto se tento typ někdy řadí do deskových výměníků. Na Obr. 4.11 je zobrazen princip spirálového výměníku.

Mezi výhody spirálového výměníku patří jeho kompaktnost, nízké tlakové ztráty a malý sklon k zanášení.

Nevýhodou je omezení tlaků.



Obr. 4.11 Schéma spirálového výměníku [18]



Obr. 4.10 Spirálový výměník [19]

### 4.1.4 Porovnání rekuperačních výměníků

Použitý pramen [21] uvádí, že v současnosti jsou nejpoužívanější typy výměníků svařované plášťové výměníky. A to především díky svému univerzálnímu použití pro kapaliny i plyny (včetně fázových změn, tj. výparníky a kondenzátory). Jsou vhodné i pro nejnáročnější aplikace (nejvyšší tlaky, teploty a požadavky na těsnost). Deskové výměníky naopak pracují téměř výhradně s kapalinami a jsou vhodné spíše pro menší tlaky, jelikož u nich při větších tlacích vznikají problémy s netěsnostmi. Velkou výhodou je jejich kompaktnost a oproti plášťovým výměníkům i cena (což je dáno sériovostí výroby desek). Dají se použít i pro velmi agresivní prostředí (přední výrobci dodávají desky např. i z titanu a uhlíkových kompozitů). Spirálové výměníky se nejvíce uplatňují ve zpracovatelském průmyslu, díky svému malému sklonu k zanášení. Stejně jako u deskového výměníku je nevýhodou omezení tlaků.



**Porovnání rekuperačních výměníků [21]**

Typ výměníku	Provozní tlaky [Mpa]	Teploty [°C]	Kompaktnost	Účinnost	Odolnost vůči zanášení
Plášťový	>4	>300	+	+	+
Deskový	< 2.5 těsn.	100-200	+++	++	++
	<4 svař.	300			
Spirálový	<1.8	<400	++	++	+++

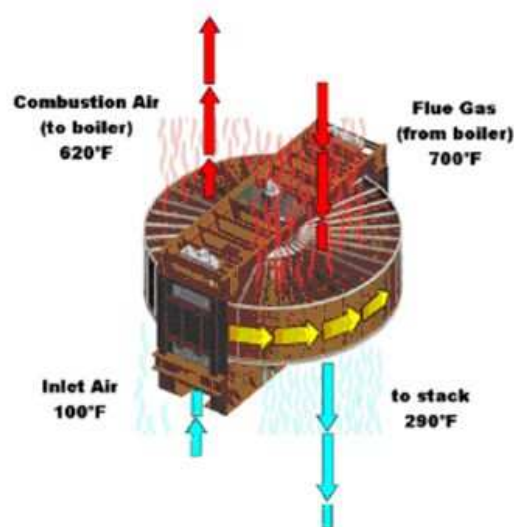
Vysvětlivky: + horší  
 ++ dobrý  
 +++ nejlepší

**4.2 Konstrukce regeneračních výměníků**

Podle použitého pramene [3] se regenerační výměník nejčastěji používá v energetice jako ohřívací vzduchu kotle spaliny-vzduch. Přenos tepla se uskutečňuje prostřednictvím pohyblivé (rotační) nebo nepohyblivé výplně. Výměníky s pohyblivou výplní můžeme dále rozdělit na horizontální a vertikální.

Princip regeneračního vertikálního výměníku Ljungström je znázorněno na Obr. 3.12. Ohřívací médium předává teplo této výplni a následně se toto naakumulované teplo předává médiu ohřivanému. Rotor je vestavěn do uzavřeného prostoru, rozděleného a současně utěsněného sektorovými deskami na spalínovou a vzduchovou část. Utěsnění rotoru je provedeno pevnými kovovými ucpávkami upevněnými radiálně a axiálně na konstrukci mezi jednotlivými sektory.

Výhřevná náplň musí splňovat několik požadavků jako dobrý přenos tepla, malé tlakové ztráty, levné zhotovení, snadné čištění za provozu, odolnost proti korozi. Výhřevná náplň je uložena v rotoru ve dvou až třech vrstvách.



Obr. 4.12 Schéma regeneračního výměníku [20]

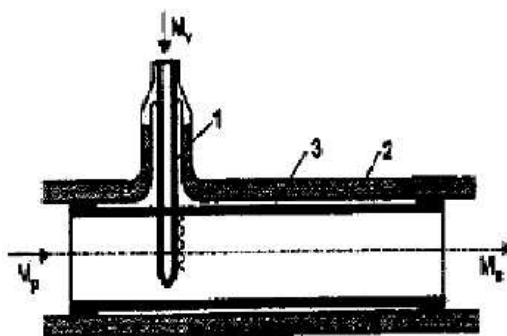
**4.3 Konstrukce směšovacích výměníků**

Tento druh výměníku nemá v porovnání s ostatními typy výměníků teplosměnné plochy. Ohřívací i ohřívané médium se smíchají a vytvoří homogenní směs. Podle zdroje [2] se nejčastěji tento druh výměníku používá pro vstřik vody do páry a ohřev napájecí vody.

### 4.3.1 Vstřík vody do páry

Vstřík vody do páry se nejčastěji používá k regulaci teploty přehřáté páry. Tato aplikace je jednostranná, tzn. snižuje teplotu přehřáté páry. Vstříkovaná voda je vždy chladnější než pára, a proto je nutné zabránit přímému styku s tlustostěnným pláštěm potrubí. Přívodní potrubí se proto přivařuje k ochrannému nátrubku. Vypaření kapiček trvá určitou dobu a chladič proto musí mít dostatečně dlouhou vložku.

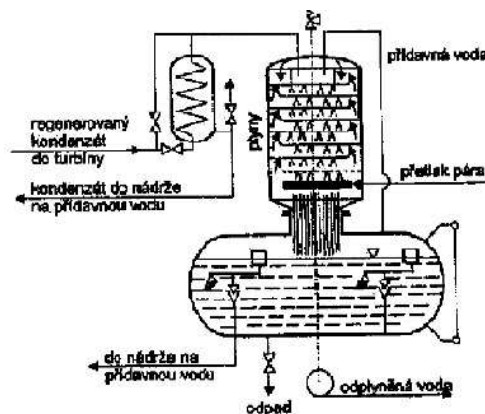
Hlavní výhodou těchto chladičů páry oproti rekuperačním chladičům páry je jednoduchost konstrukce a rychlá odezva na teplotu přehřáté páry. Princip je znázorněn na Obr. 4.13.



Obr. 4.13 Vstřík vody do páry [2]

### 4.3.2 Ohřev napájecí vody

Jedná se o mísení vody a nízkotlaké páry. Protože vedle výměny tepla zde dochází i ke změně chemického složení, nazývají se tyto výměníky tepla odplynovávky. Odstraňují se plyny jako kyslík, dusík, vodík a oxid uhličitý, které jsou obsažené v napájecí vodě. Tepelné odplynění se uskutečňuje většinou při teplotě varu 105 °C při mírném přetlaku. Princip odplynovávky je na Obr. 4.14.



Obr. 4.14 Odplynovák [2]



## 5 ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI

Vytváření efektivních výměníků tepla je v současné době velmi aktuální. Zároveň se snahou o zvyšování účinnosti výměníků je třeba mít na paměti ostatní požadavky kladené na výměník jako cena, spolehlivost atd. (viz kapitola 1.2). Dle použitých zdrojů [1,2] můžeme kromě výběru vhodného materiálu a teplosměných médií zlepšit sdílení tepla několika metodami.

### a) Zvětšování teplosměnného povrchu pomocí žebrování

Jelikož žebra nejsou pevnostně namáhána, jsou z hlediska hmotnosti vysoce efektivní teplosměnný element. Jestliže 1 m<sup>2</sup> teplosměnné plochy trubky o tloušťce 2 mm představuje hmotnost 15 kg, pak stejná teplosměnná plocha žebra o síle 0,4 mm má hmotnost pouze 1,5 kg. Žebrování se provádí na vnější i vnitřní straně teplosměnného povrchu, pokud je malý součinitel přestupu tepla (viz kapitola 3.4). Pokud jsou součinitelé přestupu tepla rozdílné, žebrování se provede na té straně, kde je součinitel přestupu tepla menší. V energetice například u plášťových žebrovaných výměníků proudí obvykle uvnitř trubek voda nebo pára a na vnější žebrované straně vzduch nebo spaliny. Při žebrování je snaha splnit podmínku

$$\alpha_1 \cdot S_1 = \alpha_2 \cdot S_2$$

Žebrování může být:

- **Příčné** – žebra mohou být vyválcována z materiálu trubky nebo navinuta na trubku ve formě pásků nebo drátu. V takovém případě je možná kombinace materiálů. Schéma je na Obr. 5.1.
- **Podélné** - velmi často se používá pro vnější povrch. Tvoří se z profilových pásků přivařených k trubce.

### b) Zdokonalení provedení výměníků

Spočívá především v odstranění mrtvých koutů, zkratových proudů, utěsnění výměníku a v dokonalém provedení odvodu vzduchu.

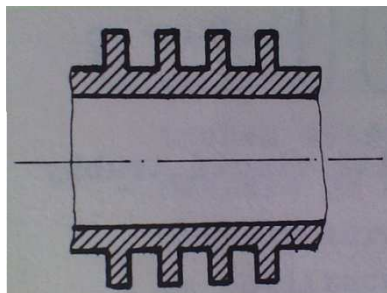
### c) Zvýšení turbulence proudu

Zvýšením turbulence proudu zvýšíme součinitel přestupu tepla. Díky turbulenci má také výměník menší sklon k zanášení. Tohoto efektu se dosahuje použitím následujících prvků.

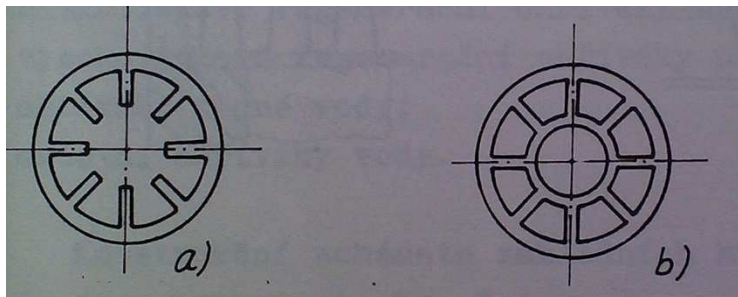
- **Pulzátory** – mohou to být např. zvlněné pásy plechu vložené do trubek, prolisování desek některých deskových výměníků, vytvoření trubek nekruhového průřezu se zvlněnými stěnami.
- **Mixery** – tyto prvky kromě turbulence také proud roztáčejí. Tento efekt mají například kuličky vyplňující prostor trubky nebo pásek plechu stočený do šroubovice a vložený do trubky.
- **Destruktory laminární podvrstvy** – jsou při podélném obtékání vnějšího povrchu tvořeny výstupky nebo kroužky na trubce. Uvnitř trubky je účinným destruktoem drát stočený do šroubovice a vložený do trubky.

Deskové výměníky mají všechny desky prolisovány tak aby v proudícím médiu docházelo k intenzivní turbulenci. Příklad prolisované desky je na Obr. 5.4.

Při použití kteréhokoli prostředku na zvýšení turbulence proudu je třeba mít na paměti, že se zvyšováním součinitele přestupu tepla se zároveň zvyšují i tlakové ztráty. Používají se zejména při laminárním a přechodovém proudění.



*Obr. 5.1 Příčná žebra trubky [1]*



*Obr. 5.2 Vnitřní žebrování trubek [1]*



*Obr. 5.3 Trubka s příčným žebrováním [22]*



*Obr. 5.4 Prolisování desky deskového výměníku [23]*

## 6 PROVOZ VÝMĚNÍKŮ TEPLA

Při provozu výměníků tepla vznikají určité základní mechanizmy poruch, které je nutné mít na paměti.

### 6.1 Poškozování výměníků

Použitý zdroj [1] uvádí, že výměníky tepla mohou podléhat různým druhům poškození spojených s prouděním médií, jako jsou koroze, abraze, kavitace a konečně vlivem zbytkových napětí a napětí od zatížení mohou vznikat trhliny.

- **Koroze**

Koroze ve výměnících je způsobena teplotními médii a kvalitou teplosměnných trubek. Hospodárnost na jedné straně a účinnost na straně druhé vyžaduje, aby výměna tepla probíhala přes relativně tenké stěny. To znamená, že zvolené materiály musí mít dostatečnou korozivzdornost.

- **Abraze**

Abraze vzniká tam, kde teplotní látky obsahují tuhé částice, většinou ze spalování. Tyto částice (většinou na straně spalin) způsobují úbytek materiálu tzv. popílkovým otěrem. Typické jsou tyto abraze u ohříváků vody a u ohříváků vzduchu kotle. Prevence je možná snížením rychlosti spalin, případně pasivními ochranami (plechy v první řadě trubek a řešením trubek v zákrytu).

- **Kavitace**

Kavitace se objevuje tehdy, když kombinace proudu a statické vrstvy je taková, že vytváří kapilárně tahová napětí. Vytvářejí se bublinky, které se později rozbíjejí na kovovém povrchu nebo blízko něho, čímž vznikají střídavě tahová a tlaková napětí v kovu. Výsledkem těchto cyklických napětí je porušení únavou, které zase způsobuje vyhloubení jamky, i když kapalina je nekorozivní. U výměníků tepla je tato forma poškozování výjimečná.

- **Porušení únavou**

Únavové porušení od příčného proudu v trubkovém prostoru není obvyklé. Vibrace trubek mohou být vyvolány, když jsou vzdálenosti mezi přepážkami relativně velké a rychlost tekutiny příliš vysoká. Porušení se objevují u přepážek nebo trubkovnic a to převážně u vnějších řad trubek.

### 6.2 Zanášení výměníků

Pramen [1] uvádí, že zanášením se rozumí proces usazování různých materiálů (zejména solí, korozních produktů a pevných látek) na teplosměnné ploše. Tyto nánosy mají za výsledek zvýšený odpor při přestupu tepla a tím zmenšení účinnosti. Dalšími problémy je zúžení průtočného průřezu a tím zvýšení rychlosti proudění média (abraze) a zvýšení tlakové ztráty. Při úplném zanesení může dojít k prasknutí trubek, svaru, či vytržení trubky z trubkovice. Můžeme rozlišit několik druhů zanášení.

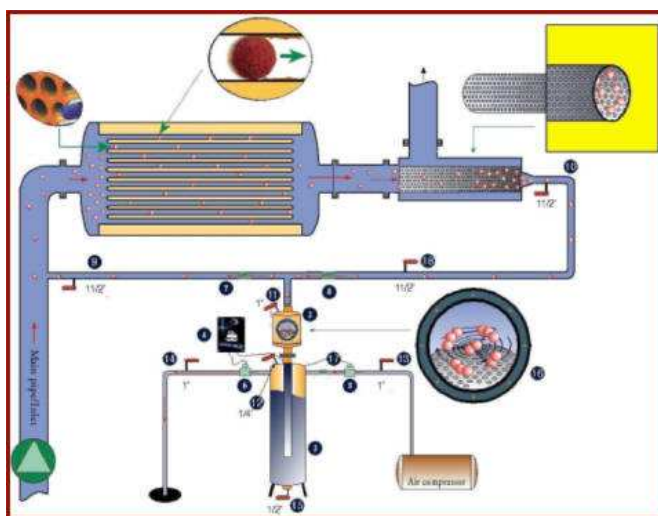
- **Vysrážení** - Tato forma zanášení je způsobována vykrystalizováním rozpuštěných látek z proudícího média. Dochází k němu vždy, když je látka při daných teplotních podmínkách přesycena těmito složkami.

- **Pevnými látkami** – k těmto látkám patří korozní produkty, prach a popílek, plovoucí vysrážené anorganické soli, jíl, organické látky, soli a kysličníky kovů z povrchových vod.
- **Korozní zanášení** – dochází k němu tak, že korozní produkty setrvávají přímo na místě vzniku – na napadeném teplosměnném povrchu a postupně tak vytvářejí vrstvu s tepelným odorem.
- **Biologické zanášení** – je způsobováno mikroorganismy vytvářejícími organický film. To bývá počátkem vytváření kombinovaných úsad a ve spojení s pevnými látkami, korozními produkty apod.
- **Chemické zanášení** – dochází k němu tehdy, vznikají-li podél teplosměnného povrchu chemické reakce. Tyto druhy nánosů se obvykle velmi obtížně odstraňují.
- **Kombinované zanášení** – je kombinací všech předchozích druhů zanášení. Jedná se o složitý proces, kdy obvykle nejprve vzniká zanášení jednoho typu a k němu se pak přidávají další formy.

### 6.3 Čištění výměníků tepla

- **Mechanické čištění za provozu metodou CQM**

Podle zdroje [24] je čištění prováděno za provozu výměníku plastovými kuličkami s povrchovými hroty, které mají stejný průměr jako trubky výměníku. Kuličky jsou v nastavených časových intervalech vpuštěny do okruhu výměníku a protaženy trubkami, čímž strhnou všechny nově vzniklé usazeniny. Tento typ čištění je nejvhodnější, pokud se vytvářejí drobné křehké usazeniny, jejichž odpor při odstraňování je nízký. Metoda CQM je na Obr. 6.1.



Obr 6.1 Mechanické čištění metodou CQM [24]

- **Mechanické čištění výměníků**

Při mechanickém čištění jsou úsady odstraňovány sekáním, odškrabáváním, vylamováním apod. Tento způsob čištění je značně pracný a obvykle vyžaduje demontáž výměníku [1]. Navíc může mít za následek poškození výměníku.

- **Chemické čištění**

Dle informací ze zdroje [25] se u deskových výměníků se nejčastěji používá chemické čištění CIP (cleaning in place). Po odpojení se systém vypustí, propláchne vodou a proti původnímu směru média se čistí vhodným čistícím prostředkem. Výběru prostředku je třeba

věnovat zvýšenou pozornost. Čisté chemikálie nebo nevhodná volba může zařízení nevratným způsobem poškodit. Čistící prostředek se vybírá podle několika kritérií jako účinnost, vhodnost pro dané prostředí, schopnost působit na různé druhy usazenin, inertní chování k materiálu výměníku, snadný plach apod. Po vyčištění se musí provést neutralizace a důkladný proplach vodou. Čištění deskového výměníku metodou CIP je na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Čištění metodou CIP [26]

U pájených deskových výměníků je to jediná možnost jak je vyčistit. Proto u nich nikdy nesmí dojít k úplnému zanesení, kdy není možná cirkulace čistící kapaliny výměníkem.

K čištění trubkových výměníků se používají čistící prostředky podobně jako u deskových výměníků. Výměník se čistí za zvýšeného tlaku. Příklad ručního čištění je na Obr. 6.3.



Obr 6.3 Ruční čištění trubkového výměníku

Výhody chemického čištění spočívají především v tom, že je poměrně rychlé, účinné, teplosměnné plochy nejsou mechanicky poškozeny, je dosaženo očištění celého povrchu včetně těžko přístupných míst a není tak pracné.

## ZÁVĚR

Z obsahu mé bakalářské práce vyplývá, že byla zaměřena na účel, funkci a provoz výměníků tepla. Výměníky tepla lze rozdělit podle několika kritérií jako způsob použití, druh vzájemného proudění médií a způsob přenosu tepla.

V závislosti na široké oblasti použití, různorodých pracovních látkách, teplotách a tlacích existuje řada konstrukčních provedení výměníků. V současnosti nejpoužívanější typy výměníků jsou svařované plášťové výměníky, díky svému univerzálnímu použití pro kapaliny i plyny a možnosti provozu za vysokých teplot a tlaků. V porovnání s ostatními rekuperačními výměníky, jako jsou deskové a spirálové výměníky, má ovšem horší účinnost a větší náchylnost k zanášení.

U výměníků tepla se neustále snažíme o zvyšování jejich účinnosti. Tu můžeme ovlivnit nejen výběrem vhodného materiálu a teplotnosných médií, ale také konstrukčními úpravami. Mezi ně patří zvětšování teplosměnného povrchu pomocí žebrování, odstranění mrtvých koutů a zvyšování turbulence proudu.

Při provozu výměníků tepla mohou vznikat různé druhy poškození spojených s proudícími médii jako jsou koroze, abraze, kavitace a porušení únavou. Dalším problémem je zanášení, které má za následek zvětšení odporu při přestupu tepla (zmenšení účinnosti) a zmenšení průtočného průřezu (zvětšení tlakových ztrát). Nánosy se odstraňují čištěním. Existuje několik způsobů jako mechanické čištění za provozu, mimo provoz a chemické čištění.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KRBEK, J., MERTA, S., POLESNÝ, B. *Výměníky tepla v průmyslové energetice*, 1990
- [2] BALÁŠ, M., *Kotle a výměníky tepla*, 1. vyd., Cerm 2009, ISBN 978-80-214-3955-9
- [3] Ochrana, L. *Spalovací zařízení a výměníky tepla*, VUT v Brně 1993, ISBN 80-214-0529-5
- [4] [webserver.dmt.upm.es/zope/DMT](http://webserver.dmt.upm.es/zope/DMT) [online], [cit. 09-04-2010], Dostupné z WWW: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c12/Heat%20exchangers.htm>
- [5] [www.profitall.cz](http://www.profitall.cz) [online], [cit. 02-04-2010], Dostupné z WWW: <http://www.profitall.cz/alb.php?s=vyrobn%C3%ADcinnost&r=100001&lang=0>
- [6] [www.hydroma.cz](http://www.hydroma.cz) [online], 2008 [cit. 02-04-2010], Dostupné z WWW: <http://www.hydroma.cz/page/67878.vodni-chladice-emmegi/>
- [7] [www.vymeniky.cz](http://www.vymeniky.cz) [online], [cit. 04-04-2009], Dostupné z WWW: <http://www.vymeniky.cz/trubkove-vymeniky-pro-chlazen%C3%AD/>
- [8] [lkh.lbc.cz](http://lkh.lbc.cz) [online], [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://lkh.lbc.cz/gal.html>
- [9] [www.allgaier.fr](http://www.allgaier.fr) [online], [cit. 05-04-2010], Dostupné z WWW: [http://www.allgaier.fr/gfx/pic/drum\\_drier.jpg](http://www.allgaier.fr/gfx/pic/drum_drier.jpg)
- [10] [www.ohrivace.com](http://www.ohrivace.com) [online], [cit. 05-04-2010], Dostupné z WWW: [http://www.ohrivace.com/rad\\_sus.html](http://www.ohrivace.com/rad_sus.html)
- [11] PAVELEK, M. *Termomechanika*, skripta VUT, 3. vyd., VUT v Brně 2003, ISBN 80-214-2409-5
- [12] [commons.wikimedia.org](http://commons.wikimedia.org) [online], 11-6-2009, [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: [http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Heat\\_exchanger\\_diagrams](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Heat_exchanger_diagrams)
- [13] [olaer.cz](http://olaer.cz) [online], 14-01-2010, [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://olaer.cz/cz-produkty-prehled/cz-produkty-chladice-3/cz-prod-kuehl-rohrbund.htm>
- [14] [www.allcool.co.uk](http://www.allcool.co.uk) [online], [cit. 05-04-2010], Dostupné z WWW: <http://www.allcool.co.uk/tubeintubeexchangers.shtml>
- [15] [www.pbstre.cz](http://www.pbstre.cz) [online], [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://www.pbstre.cz/index.php?typ=PVA&showid=81>
- [16] [www.tranter.com](http://www.tranter.com) [online], [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://www.tranter.com/pd/pf>
- [17] [www.dreher-associates.com](http://www.dreher-associates.com) [online], 2009 [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://www.dreher-associates.com/mueller/>
- [18] [www.valutechinc.com](http://www.valutechinc.com) [online], [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://www.valutechinc.com/alfalaval6.htm>
- [19] [www.tranter.com](http://www.tranter.com) [online], [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://www.tranter.com/europe/products/spiral-heat-exchangers>
- [20] [powerlab.fsb.hr](http://powerlab.fsb.hr) [online], [cit. 06-04-2010], Dostupné z WWW: <http://powerlab.fsb.hr/osnoveenergetike/wiki/index.php?title=Slika:Ter14.jpg>

- [21] pet.fsid.cvut.cz [online], [cit. 11-04-2010], Dostupné z WWW:  
<[http://pet.fsid.cvut.cz/petera/tv/tps\\_ex2.pdf](http://pet.fsid.cvut.cz/petera/tv/tps_ex2.pdf)>
- [22] www.zebrovanetrubky.cz [online], [cit. 11-04-2010], Dostupné z WWW:  
<[http://www.zebrovanetrubky.cz/index.php?call=vYROBKY\\_celohlinikf](http://www.zebrovanetrubky.cz/index.php?call=vYROBKY_celohlinikf)>
- [23] www.dostrading.eu [online], [cit. 26-04-2010], Dostupné z WWW:  
<[http://www.dostrading.eu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=19&Itemid=22](http://www.dostrading.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=19&Itemid=22)>
- [24] www.alfalaval.com [online], [cit. 26-04-2010], Dostupné z WWW:  
<<http://local.alfalaval.com/cs-cz/produkty/prenos/deskove/Pages/deskove-vymeniky.aspx>>
- [25] www.candd.cz [online], [cit. 26-04-2010], Dostupné z WWW:  
<[http://www.candd.cz/index.php?sanitace=oblasti\\_pouziti.html&sanitace2=cisteni\\_vymeniku.html](http://www.candd.cz/index.php?sanitace=oblasti_pouziti.html&sanitace2=cisteni_vymeniku.html)>
- [26] www.directindustry [online], [cit. 06-05-2010], Dostupné z WWW:  
<<http://www.directindustry.com/prod/tranter/cleaning-in-place-equipment-for-plate-heat-exchangers-6058-39236.html>>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A JEJICH JEDNOTEK

Veličina	Jednotka	Název
$q$	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	měrný tepelný tok
$\lambda$	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	tepelná vodivost
$dt$	$(^{\circ}\text{C})$	rozdíl teplot
$\delta$	$(\text{m})$	tloušťka stěny
$R$	$(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	tepelný odpor
$\alpha$	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	součinitel přestupu tepla
$T_w$	$(\text{K})$	teplota povrchu obtékaného tělesa
$T_{\infty}$	$(\text{K})$	teplota tekutiny
$\sigma$	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$	Stefan-Boltzmanova konstanta
$T$	$(\text{K})$	absolutní teplota tělesa
$\alpha_1$	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	součinitel přestupu tepla z ohřívací látky do stěny
$\alpha_2$	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	součinitel přestupu tepla ze stěny do ohřívané látky
$\lambda$	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	součinitel tepelné vodivosti materiálu stěny
$\delta$	$(\text{m})$	tloušťka stěny
$k$	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	celkový součinitel přestupu tepla